

TNO-rapport  
PML 1997-A18

## Een vergelijking van drukmetingen met SIP en de F-PVIS

TNO Prins Maurits Laboratorium

Lange Kleiweg 137  
Postbus 45  
2280 AA Rijswijk

Telefoon 015 284 28 42  
Fax 015 284 39 58

Datum  
juni 1997

Auteur(s)  
Ing. M.P. van Rooijen  
I. van der Kolk

### DISTRIBUTION STATEMENT A

Approved for public release  
Distribution Unlimited

Rubricering  
Vastgesteld door : Ing. J. van Gool  
Vastgesteld d.d. : 30 mei 1997  
(deze rubricering wijzigt niet)

Titel : Ongerubriceerd  
Managementuitreksel : Ongerubriceerd  
Samenvatting : Ongerubriceerd  
Rapporttekst : Ongerubriceerd  
Bijlage A : Ongerubriceerd

Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar  
gemaakt door middel van druk, foto-  
kopie, microfilm of op welke andere  
wijze dan ook, zonder voorafgaande  
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
Algemene Voorwaarden voor Onder-  
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel  
de betreffende terzake tussen de  
partijen gesloten overeenkomst.  
Het ter inzage geven van het  
TNO-rapport aan direct belang-  
hebbenden is toegestaan.

Exemplaar nr. : 12  
Oplage : 26  
Aantal pagina's : 39 (incl. bijlage,  
excl. RDP & distributielijst)  
Aantal bijlagen : 1

19970716 183

DTIC QUALITY INSPECTED 2

© 1997 TNO

TNO Prins Maurits Laboratorium is onderdeel  
van de hoofdgroep TNO Defensieonderzoek  
waartoe verder behoren:

TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium  
TNO Technische Menskunde



Nederlandse Organisatie voor toegepast-  
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

## Managementuittreksel

Titel : Een vergelijking van drukmetingen met SIP en de F-PVIS  
Auteur(s) : Ing. M.P. van Rooijen en I. van der Kolk  
Datum : juni 1997  
Opdrachtnr. : A94KL482  
Rapportnr. : PML 1997-A18

In het kader van de opdracht A94KL482, Schokinitiatie Explosieve stoffen, werk-pakket 1: 'Detonatiekarakteristieken' zijn diverse meettechnieken voor het meten van verschillende detonatieparameters geëvalueerd. Eén van de parameters is de detonatiedruk. Deze kan met diverse methoden worden gemeten. In dit onderzoek zijn twee methoden onderzocht: de Shock Induced Polarization (SIP) en de Fabry-Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS). Van elke methode is na enkele aanpassingen de nauwkeurigheid bepaald.

De SIP-meting berust op het principe dat sommige kunststoffen worden gepolariseerd als er een schokgolf doorheen loopt. De daardoor ontstane polarisatiespanning kan worden gemeten en is een maat voor de detonatiedruk in het explosief. Met de F-PVIS kan de oppervlaktesnelheid van een snel bewegend spiegellend oppervlak bepaald worden. Door dit spiegellend oppervlak tegen een explosief aan te brengen kan met behulp van de Hugoniot's van beide materialen de detonatiedruk bepaald worden.

Beide methoden zijn tegelijkertijd toegepast. Hierbij is uitgegaan van de bestaande SIP-meting. De F-PVIS-meting is tijdens het onderzoek verbeterd. De SIP-meting is een meetmethode om de schokgolfsnelheid in een medium te bepalen, hieruit wordt de druk in het medium berekend. Het voordeel van deze meting is dat deze vrij betrouwbaar is. Het nadeel is dat het aflezen van de doorlooptijd van de schokgolf door een SIP-plaatje vaak moeilijk is. Daar bovenop komt een extra fout omdat de schokgolfsnelheid omgerekend moet worden naar de deeltjessnelheid. Hierdoor kan de fout in de berekende druk oplopen tot bijna 16%.

Beter is de methode waarmee direct de deeltjessnelheid gemeten kan worden, dit kan met de F-PVIS. De F-PVIS maakt gebruik van het Doppler-effect: licht dat gereflecteerd wordt op een snel bewegend voorwerp ondergaat een golflengteverandering. Met behulp van een Fabry-Perot etalon wordt een interferentiepatroon gegenereerd dat afhankelijk is van deze golflengteverandering. Dit patroon wordt met een streakcamera opgenomen. Op de film van deze camera is een veranderend strepenpatroon te zien waarvan de *lengte* een maat is voor de schokgolfsnelheid in een medium. Hieruit kan de druk in een medium met een maximale fout van  $\pm 13,5\%$  bepaald worden. De *afstanden tussen de lijnen* zijn een maat voor de deeltjessnelheid. Als hieruit de druk wordt berekend is een stap minder nodig dan

bij berekening van de druk uit de schokgolfsnelheid, de fout in het resultaat is hierdoor maximaal  $\pm 12,5\%$ . Er kunnen dus twee schokgolfgrootheden, te weten schokgolfsnelheid en deeltjessnelheid, gemeten worden in één meting. De fout in de resultaten behaald met de F-PVIS wordt voornamelijk veroorzaakt door de kwaliteit van het beeld op de film.

## Samenvatting

Er zijn diverse meetmethoden bekend om drukken in explosieve stoffen te meten. Een voorbeeld van een drukmeting die reeds toegepast wordt binnen Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid groep Eigenschappen Energetische Materialen (EM) is de Shock Induced Polarization (SIP)-meting. Een nieuwere drukmeting maakt gebruik van het Fabry Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS). Om de nauwkeurigheid van deze laatste methode te bepalen wordt deze vergeleken met de SIP-meting.

De SIP-meting is een meetmethode om de schokgolfsnelheid in een medium te bepalen, hieruit wordt de druk in het medium berekend. Het voordeel van deze meting is dat deze vrij betrouwbaar is. Het nadeel is dat het aflezen van de doorlooptijd van de schokgolf door een SIP-plaatje vaak moeilijk is. Daar bovenop komt een extra fout omdat de schokgolfsnelheid omgerekend moet worden naar de deeltjessnelheid. Hierdoor kan de fout in de berekende druk oplopen tot bijna 16%.

Beter is de methode waarmee direct de deeltjessnelheid gemeten kan worden, dit kan met de F-PVIS. De F-PVIS maakt gebruik van het Doppler-effect: licht dat gereflecteerd wordt op een snel bewegend voorwerp ondergaat een golflengteverandering. Met behulp van een Fabry-Perot etalon wordt een interferentiepatroon gegenereerd dat afhankelijk is van deze golflengteverandering. Dit patroon wordt met een streakcamera opgenomen.

Op de film van deze camera is een veranderend strepenpatroon te zien waarvan de *lengte* een maat is voor de schokgolfsnelheid in een medium. Hieruit kan de druk in een medium met een maximale fout van  $\pm 13,5\%$  bepaald worden.

De *afstanden tussen de lijnen* zijn een maat voor de deeltjessnelheid. Als hieruit de druk wordt berekend is een stap minder nodig dan bij berekening van de druk uit de schokgolfsnelheid, de fout in het resultaat is hierdoor maximaal  $\pm 12,5\%$ . Er kunnen dus twee schokgolfgrootheden, te weten schokgolfsnelheid en deeltjessnelheid, gemeten worden in één meting. De fout in de resultaten behaald met de F-PVIS wordt voornamelijk veroorzaakt door de kwaliteit van het beeld op de film.

## Inhoud

Managementuittreksel .....	2
Samenvatting .....	4
1 Inleiding .....	7
2 Het Fabry-Perot Interferometer System .....	8
2.1 De principiële werking van de F-PVIS .....	8
2.2 Het Fabry-Perot etalon (FP).....	9
2.3 De tijdsresolutie van het etalon .....	11
2.4 Snelheidsberekening uit interferentiepatronen .....	11
2.5 De Fringe-constante.....	12
3 De Shock Induced Polarisation (SIP)-meting .....	13
3.1 De principiële werking van de SIP-meting .....	13
3.2 Snelheidsbepaling uit elektrische signalen .....	14
4 Uitvoering van gecombineerde drukmetingen .....	15
4.1 De originele opstelling (F-PSIP1).....	17
4.2 Reflectie met een goudlaag (F-PSIP2).....	20
4.3 Schokgolfdemping met PMMA (F-PVIS4) .....	23
4.4 Mislukte meting dicht op de springstof (F-PSIP5) .....	25
4.5 Gelukte meting dicht op de springstof (F-PSIP6).....	27
5 Foutberekening in de F-PVIS en SIP-resultaten .....	30
5.1 Fout in de druk uit de met de F-PVIS-gemeten deeltjes- snelheid .....	30
5.2 Fout in de druk uit de met de F-PVIS-gemeten schok- golfsnelheid.....	31
5.3 Fout in de SIP-resultaten.....	32
6 Drukberekeningen met de Kamlet-methode.....	33
7 Conclusie en discussie .....	34
8 Verklaring van gebruikte symbolen en woorden .....	36
9 Referenties.....	37

10	Ondertekening .....	38
----	---------------------	----

Bijlage:

A      Streakopname F-PVIS

## 1 Inleiding

In de loop van de tijd zijn er bij TNO-PML diverse metingen ontwikkeld om springstoffen te karakteriseren. Dit kan door bijvoorbeeld de schokgolfsnelheid, deeltjessnelheid, druk en dergelijke in een springstof te meten. Deze parameters zijn aan elkaar gerelateerd wat beschreven wordt in de schokgolftheorie.

Er zijn op dit moment diverse meetmethoden om de verschillende parameters te bepalen. De druk kan bijvoorbeeld worden bepaald met de SIP-meting waarbij gebruikgemaakt wordt van de diëlectrische eigenschappen van kunststoffen. Met behulp van de schokgolf is het mogelijk sommige kunststoffen elektrisch te polariseren.

Sinds 1994 wordt er met behulp van licht de deeltjessnelheid in springstoffen en andere materialen bepaald. De hiervoor gebruikte opstelling is de Fabry-Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS). De meetmethode is gebaseerd op het Dopplereffect waaruit volgt dat gereflecteerd licht afkomstig van een snel bewegend voorwerp, bijvoorbeeld een spiegel op een detonerend explosief, van golflengte verandert. De snelheid van dat bewegende voorwerp kan uit een veranderend interferentiepatroon worden bepaald. Deze opstelling is in de loop van de tijd verder ontwikkeld en getest door diverse stagiairs [4]. Hierbij is altijd met behulp van een glasvezel met daarop een grinlens gemeten. Deze grinlens wordt gebruikt om het inkoppelendement van het licht aan het uiteinde van de glasvezel te verhogen. Het bewegende voorwerp bestaat uit koperfolie of retro-reflecterend materiaal op een explosief. Ondanks goede resultaten zijn nog diverse punten te verbeteren aan deze meetmethode.

Het probleem met deze oude en nieuwe metingen is dat de nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid niet bekend is. De resultaten zijn overeenkomstig theoretische waarden maar eventuele verschillen in de meetwaarden van één en dezelfde meetmethode (reproduceerbaarheid) en tussen de methoden onderling (nauwkeurigheid) zijn niet bekend. Door nu meerdere metingen tijdens één experiment uit te voeren kunnen resultaten worden vergeleken en eventuele verschillen mogelijk worden verklaard<sup>1</sup>. Het onderzoek is grotendeels uitgevoerd door I. van der Kolk, een afstudeerder van de r.k. T.H. Rijswijk [7]. Dit rapport is een samenvatting van zijn bevindingen.

---

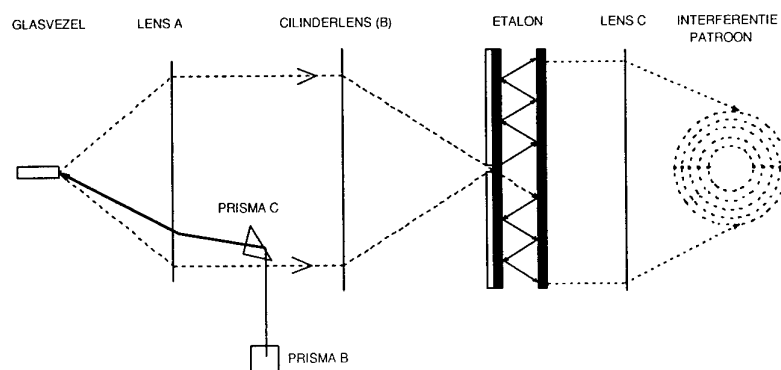
<sup>1</sup> Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van de opdracht A94/KL/482, Schokinitiatie Explosieve Stoffen, werkpakket 1: Detonatiekarakteristieken.

## 2 Het Fabry-Perot Interferometer System

Om de snelheid van een reflecterend oppervlak te kunnen bepalen is het Fabry-Perot Velocity Interferometer System ontwikkeld. Dit systeem is in staat zeer hoge deeltjessnelheden, zoals deze optreden bij explosies, door middel van veranderen de interferentiepatronen te meten. De gevonden deeltjessnelheden kunnen met behulp van de schokgolftheorie worden omgerekend naar drukken. De huidige F-PVIS maakt gebruik van een Fabry-Perot etalon met grote spiegels, de afstand tussen deze spiegels is instelbaar.

### 2.1 De principiële werking van de F-PVIS

Laserlicht afkomstig van een argonlaser wordt via prisma's door lens A naar de fibertip geleid, daar wordt het licht in de glasvezel gekoppeld. Aan het einde van de glasvezel wordt het licht uitgekoppeld. Het uitgekoppelde licht wordt gereflecteerd door het te meten object en weer terug in de vezel gekoppeld. Aan de andere kant van de vezel wordt het licht weer uitgekoppeld en dit valt op lens A. De fibertip staat in het brandpunt van deze lens zodat een evenwijdige bundel gevormd wordt van het brandpunt uitgestraalde licht. De evenwijdige lichtbundel valt daarna op cilinderlens B. Deze focuseert het licht in één richting op de spleet van de eerste spiegel (diameter 50 mm) van het Fabry-Perot etalon. Dit etalon genereert een interferentiepatroon dat door lens C op de streakcamera wordt geprojecteerd.



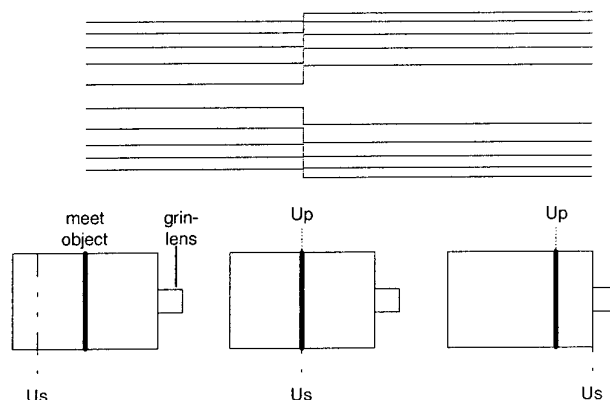
Figuur 1: Werking van de F-PVIS.

Indien het meetobject bij het uiteinde van de glasvezel nu plotseling een bepaalde snelheid krijgt zal het door dit meetobject gereflecteerde licht door het Doppler-



effect een golflengteverandering ondergaan, wat resulteert in een veranderend interferentiepatroon. Uit dit veranderende patroon is de snelheid van het reflecterend oppervlak te bepalen. Doordat een cylinderlens gebruikt wordt zal één vlak in het ringenpatroon meer belicht worden dan de rest van de ringen.

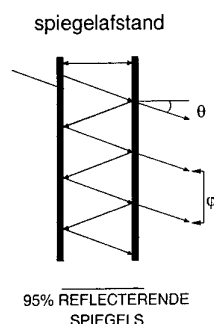
Dit gedeelte van het interferentiepatroon wordt op de spleet van een streakcamera geprojecteerd. Met behulp van een snel ronddraaiende spiegel worden de punten op een film afgebeeld zodat er lijnen op de film verschijnen (zie figuur 2). Bij een bekende rotatiesnelheid van de spiegel wordt op deze manier de afstand tussen de punten als functie van de tijd zichtbaar gemaakt [4].



Figuur 2: Het resultaat van een verschuiving op de film.

## 2.2 Het Fabry-Perot etalon (FP)

Het Fabry-Perot etalon is het hart van de F-PVIS en wordt gevormd door twee planparallelle spiegels met een reflectiecoëfficiënt van ongeveer 95%. Een bundel laserlicht die op de eerste spiegel van het etalon invalt wordt op deze manier voor 95% gereflecteerd en voor 5% doorgelaten in het etalon, dit is te weinig. Daarom is in het etalon een spleet van 100  $\mu\text{m}$  breedte in de reflectiecoating van de eerste spiegel gemaakt zodat meer licht wordt ingekoppeld. De cylinderlens zorgt dat zoveel mogelijk licht op deze spleet wordt gefocusseerd. Dit licht valt direct in op de tweede spiegel waar 5% licht uit het etalon wordt gekoppeld en 95% licht wordt gereflecteerd. Zo wordt bij elke reflectie 95% van het licht gereflecteerd.



Figuur 3: Fabry-Perot etalon.

Het licht heeft nu een faseverschil met het licht dat bij de eerste keer wordt uitgekoppeld. Dit faseverschil wordt veroorzaakt door de verschillende afstanden die het licht aflegt (optisch weglengteverschil). Indien het onderlinge faseverschil een veelvoud is van een hele golflengte plus een halve golflengte zal het licht uitdoven. Bij een faseverschil dat overeenkomt met een veelvoud van een hele golflengte zal het licht constructief interfereren.

Voor het faseverschil in het uitgekoppelde licht geldt:

$$\varphi = \frac{2 \cdot n \cdot d \cdot \cos \theta}{\lambda} \cdot 2 \cdot \pi \quad (1)$$

waarin:

- $\varphi$ : faseverschil [rad];
- $n$ : brekingsindex stof tussen spiegels [-];
- $d$ : afstand tussen spiegels [m];
- $\theta$ : hoek tussen normaalspiegel en lichtstraal [rad];
- $\lambda$ : golflengte van het licht [m].

Voor de intensiteit van het licht als functie van het faseverschil geldt:

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4 \cdot R \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (2)$$

waarin:

- $R$ : reflectiecoëfficiënt van de spiegels [-]

Hieruit valt af te leiden dat een maximum optreedt indien de sinusfactor 0 is, wat voorkomt bij een faseverschil gelijk aan  $m2\pi$  ( $m \in \mathbb{Z}$ ), oftewel een hele periode. De doorgelaten hoeveelheid licht is minimaal als de sinusfactor 1 is. Het faseverschil is dan gelijk aan  $(m2+1) \cdot \pi$ . Hieruit blijkt dat het interferentiepatroon uit concentrische ringen moet bestaan. Als men achter het etalon een convergerende lens (lens C) plaatst zal men het interferentiepatroon kunnen afbeelden op een scherm. De diameter van deze ringen wordt dan gegeven door de formule:

$$D_j = 2 \cdot f_c \cdot \sqrt{\frac{j \cdot \lambda}{d}} \quad (3)$$

waarin:

- D : diameter ring [m];  
 f<sub>c</sub> : brandpuntsafstand lens [m];  
 j : ringorde [-];  
 c : lichtsnelheid [m·s<sup>-1</sup>].

### 2.3 De tijdsresolutie van het etalon

Zoals eerder vermeld is bestaat het FP-etalon uit twee planparallelle spiegels waartussen het licht heen en weer wordt gereflecteerd. Doordat het licht verschillende afstanden aflegt zal een faseverschil ontstaan in het uitgekoppelde licht. Door het afleggen van deze verschillende wegen krijgt het licht behalve een onderling faseverschil ook een onderlinge vertraging die bij veel reflecties behoorlijk op kan lopen zodat het uitgekoppelde licht uitgesmeerd wordt over de tijd.

Bij dynamische metingen, waarbij het interferentiepatroon dus moet veranderen, is dit effect zeer belangrijk, het bepaalt in belangrijke mate de tijdsresolutie. De tijd die nodig is om 90% van het ingevallen licht uit te koppelen noemt men de fill-time en wordt berekend met de formule:

$$t_{90\%} = \frac{2 \cdot d \cdot \ln(1 - R)}{c \cdot \ln R} \quad (4)$$

waarin:

- t<sub>90%</sub>: tijd voor het uitkoppelen van 90% ingevallen licht [s].

### 2.4 Snelheidsberekening uit interferentiepatronen

De concentrische ringen waaruit het interferentiepatroon bestaat kunnen worden gebruikt bij diverse metingen waarbij licht beïnvloed kan worden (bijvoorbeeld brekingsindexverschillen door luchtdrukverandering, frequentieverandering door snelheid en dergelijke). De diameterverandering van de ringen geldt dan in het algemeen als resultaat van de meting, deze diameters moet dan wel nauwkeurig bekend zijn.

Volgens Doppler ondervindt licht, dat is gereflecteerd op een snel bewegend voorwerp, een golflengteverandering ten opzichte van het invallende licht volgens:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{2 \cdot v}{c} \quad (5)$$

waarin:

$\Delta\lambda$ : golflengteverandering [m];

$v$ : snelheid van het bewegende voorwerp [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

Opm.: een snelheid in de richting van de invallende lichtstraal geeft een positieve golflengteverandering.

Zoals al eerder is opgemerkt bestaat het interferentiepatroon, gegenereerd door de Fabry-Perot, uit een aantal concentrische ringen. Volgens formule 3 is de diameter van deze ringen onder andere afhankelijk van de golflengte. Bij een veranderende golflengte door het Doppler-effect is de diameterverandering van de ringen dus een maat voor de snelheidsverandering. De formule hiervoor is:

$$v = \left( i + \frac{D_v^2 - D_j^2}{D_{j+1}^2 - D_j^2} \right) \cdot \frac{\lambda \cdot c}{4 \cdot d} \quad (6)$$

of

$$v = (D_v^2 - D_j^2) \cdot \frac{c}{16 \cdot f_c^2} \quad (7)$$

waarin:

$v$ : snelheid van een bewegend voorwerp [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$D_j$ : diameter van de  $j^{\text{de}}$  niet verschoven orde [m];

$D_v$ : diameter van de bij  $D_j$ -horende verschoven orde [m];

$D_{j+1}$ : diameter van de eerstvolgende, niet verschoven, hogere orde [m];

$f_c$ : brandpuntsafstand lens C [m].

Het veranderende interferentiepatroon is dus een maat voor de snelheidsverandering. Aangezien de beginsnelheid bekend is (het reflecterende oppervlak begint vanuit stilstand) is de snelheidsverandering ook gelijk de eindsnelheid.

## 2.5 De Fringe-constante

Indien een orde zodanig verschuift dat deze precies op de volgende orde komt te liggen, dan is de verschuiving gelijk aan de Fringe-constante. Deze Fringe-constante is te berekenen met de formule:

$$F_c = \frac{c \cdot \lambda}{4 \cdot d} \quad (8)$$

waarin:

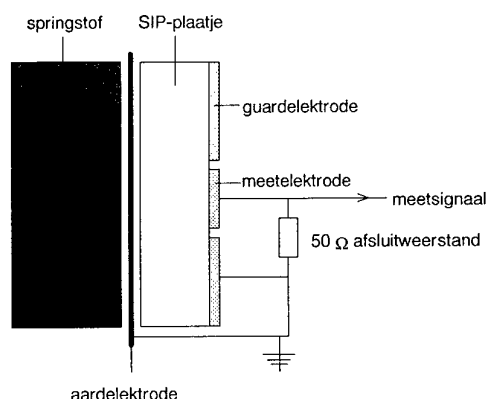
$F_c$ : Fringe-constante [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

### 3 De Shock Induced Polarisation (SIP)-meting

In dit hoofdstuk wordt de SIP-methode beschreven en de basisprincipes van deze methode. De SIP-meting is een drukmeting en wordt al geruime tijd toegepast. Doel hiervan is de schokgolfsnelheid te meten en deze met behulp van de schokgolftheorie om te rekenen naar de druk.

#### 3.1 De principiële werking van de SIP-meting

De SIP-methode berust op het principe dat sommige kunststoffen elektrisch gepolariseerd worden als er een schokgolf doorheen loopt. De daardoor ontstane polarisatiespanning kan worden gemeten met een snelle oscilloscoop. Dit wordt gedaan door een kunststofplaatje tussen een aard- en een meetelektrode te plaatsen met daar overheen een afsluitweerstand (figuur 4). Het kunststofplaatje bestaat meestal uit een polymethylmethacrylaat (PMMA) en wordt het SIP-plaatje genoemd. Om het elektrische veld dat tijdens de meting optreedt niet te verstoren wordt er ook nog een gardelektrode toegevoegd. Voordat een meting met het plaatje wordt uitgevoerd is het belangrijk de dikte van het plaatje zo nauwkeurig mogelijk op te meten, omdat met behulp van de dikte van het plaatje de schokgolfsnelheid wordt bepaald.



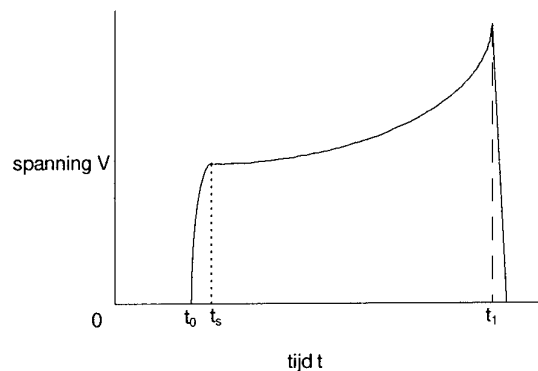
Figuur 4: de SIP-meetopstelling.

Het meetsignaal op de oscilloscoop heeft de vorm zoals getoond in figuur 5. Op het tijdstip  $t_0$  treedt de schokgolf bij het SIP-plaatje in. Op tijdstip  $t_1$  heeft de schokgolf de meetelektrode bereikt. De stijgtijd van het signaal  $t_s - t_0$  wordt bepaald door:

- de vlakheid van de schokgolf;
- de grootte van de elektroden;
- de weerstand op het contactvlak aansluitdraden(SIP-pennen)/SIP-plaatje.

De stijgtijd is dus eigenlijk een maat voor de kwaliteit van de meting want hoe kleiner deze stijgtijd is, des te beter het tijdstip  $t_0$  bepaald kan worden. Tussen  $t_s$  en  $t_1$  is een kromme te zien. Deze kromme wordt veroorzaakt door de condensatorwerking van de opstelling. De meetelektrode en de schokgolf vormen de platen van de condensator. Het tussenliggende PMMA doet dienst als diëlektricum. Door de polarisatie van het diëlektricum gedraagt het geheel zich als een opladende condensator. Na het invallen van de schokgolf bewegen de platen (en dus niet de elektroden) met de schokgolfsnelheid naar elkaar toe.

Er wordt echter ook steeds meer PMMA gepolariseerd zodat de spanning tussen de elektroden snel toeneemt. Als de schokgolf de meetelektrode bereikt vormen de condensatorplaten een kortsluiting en gaat de spanning naar 0 V.



Figuur 5: Een voorbeeld van een SIP-meetsignaal.

### 3.2 Snelheidsbepaling uit elektrische signalen

De doorlooptijd van de schokgolf door het SIP-plaatje kan worden bepaald uit het verschil tussen de tijden  $t_0$  en  $t_1$  en de dikte van het SIP-plaatje

$$v = \frac{L_{SIP}}{\Delta t} \quad (9)$$

waarin:

$L_{SIP}$ : dikte van het SIP-plaatje [m];

$\Delta t$ : doorlooptijd van de schokgolf door het SIP-plaatje [t].

De druk in de springstof kan nu met behulp van de schokgolftheorie worden berekend.

## 4 Uitvoering van gecombineerde drukmetingen

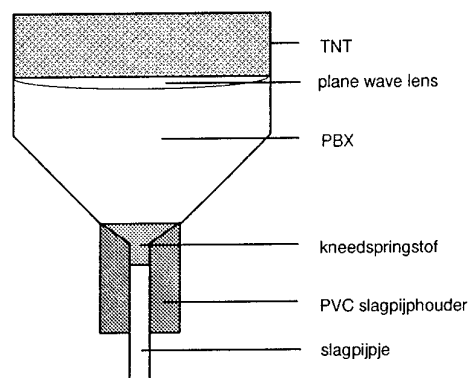
Als men de Hugoniot-vergelijking van een medium wil bepalen moet er een serie metingen worden uitgevoerd waarin telkens twee grootheden uit de schokgolftheorie tegelijkertijd worden bepaald. Bijvoorbeeld de deeltjessnelheid met de F-PVIS en de schokgolfsnelheid volgens de SIP-methode. Met behulp van de computer kan dan de relatie tussen de gemeten grootheden worden gezocht ('curve-fitten'). Uit de fit zijn dan de parameters voor de Hugoniot-vergelijking voor dat materiaal af te leiden. De nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de meetmethoden moet dan wel precies bekend zijn.

Als de Hugoniot-vergelijking van een materiaal al bekend is kan met het meten van één van de schokgolfgrootheden worden volstaan, de andere grootheden kunnen dan berekend worden. Daarom gebruiken we, om de verschillende methoden te kunnen testen en vergelijken, alleen materialen waarvan de Hugoniot-vergelijkingen bekend zijn.

Om de diverse meetmethoden goed te kunnen vergelijken moeten ze tegelijkertijd in één meting worden uitgevoerd: eventuele spreiding in de eigenschappen van de springstof worden zo geëlimineerd. Aangezien het oppervlak van het explosief waaraan gemeten wordt beperkt is, moet er eerst een goede opstelling worden gemaakt die eenvoudig en compact is. Omdat ook de reproduceerbaarheid wordt gemeten is het van belang de inleiding ook zo reproduceerbaar mogelijk te laten plaatsvinden. Hierbij wordt gebruikgemaakt van een Plane Wave Lens (PWL) donorklading waarop een TNT booster is aangebracht (diameter 60 mm; hoogte 20 mm). De specificaties van de PWL zijn:

diameter:	60 mm;
formule lensbolling:	$d = 18,00 - 0,0189r^2$ ;
	d: hoogte lens [mm];
	r: straal lens [mm];
explosief:	PBX: RU-81.

De initiatie vindt plaats met een PL 438 slagpijpje. Tussen het slagpijpje en de PBX van de PWL wordt kneedspringstof geplaatst (DM12) om een goed contact tussen beide onderdelen te verkrijgen. Het hele donorsysteem wordt getoond in figuur 6.



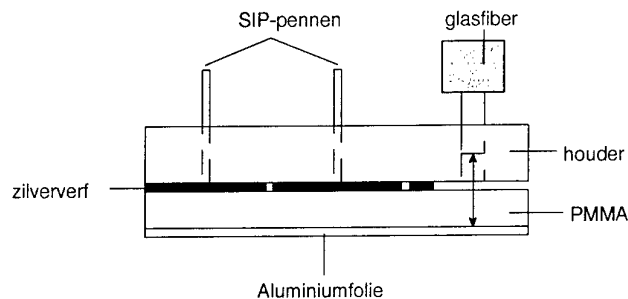
*Figuur 6: De PWL-donorlading.*

Het meetgedeelte is gedurende het onderzoek aangepast, met de voorwaarde dat beide meetmethoden (F-PVIS en SIP) tegelijkertijd kunnen worden gebruikt. De verschillende configuraties worden in de volgende paragrafen besproken, waarna telkens ook de resultaten met deze configuratie worden besproken.

De resultaten worden verkregen door meetgegevens van de F-PVIS- en SIP-meting om te rekenen naar de druk in de springstof. In de hiervoor gebruikte Hugoniot-vergelijkingen, waarbij de parameters met behulp van een 'curve-fit' bepaald zijn, moeten de eenheden in  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  en GPa worden uitgedrukt. Om verwarring te voorkomen zijn in dit hoofdstuk alle grootheden volgens deze eenheden ingevuld. In het hieropvolgende hoofdstuk is een foutberekening uitgevoerd over de gevonden resultaten. In hoofdstuk 6 wordt de drukkerekening nog eens herhaald maar nu wordt er van uitgegaan dat de Hugoniot van de springstof onbekend is. In hoofdstuk 7 wordt een nieuwe methode, de glasfiberprobe, besproken.



#### 4.1 De originele opstelling (F-PSIP1)



Figuur 7: De opstelling bij meting F-PVIS1.

##### 4.1.1 De SIP-meting (schokgolfsnelheidsmeting)

Om eerdere meetresultaten van de SIP-meting te kunnen gebruiken, is in eerste instantie geprobeerd zoveel mogelijk de originele meetopstelling te behouden. Bij de originele SIP-meting wordt de gehele PWL-donorlading in aluminiumfolie gewikkeld (huishoudfolie). Op het TNT wordt een dunner stuk aluminiumfolie ( $10\mu\text{m}$ ) gelegd. Dit folie is van tevoren gladgewreven zodat het goed contact maakt met de springstof. Dit aluminiumfolie dient als aardelektrode voor de SIP-meting. Op dit aluminiumfolie komt het SIP-plaatje te liggen (zie figuur 7). De dikte van dit plaatje moet zo precies mogelijk worden opgemeten omdat met behulp van deze dikte schokgolfsnelheidsberekening plaatsvindt.

De guard- en de meetelektrode worden gemaakt door de bovenzijde van het SIP-plaatje met zilververf te beschilderen (dit geleidt de elektrische stroom goed). In het midden van het plaatje wordt in de zilververflaag met behulp van een kraspaser een cirkel gekrast. De binnencirkel (10 mm diameter) wordt de meetelektrode en het gebied daarbuiten de gardelektrode.

Voor het aansluiten van deze elektroden solderen we koperen staafjes aan de meetdraden. Deze worden in een plexiglas balkje, waarin twee gaatjes zijn geboord, geschoven en het geheel komt op het SIP-plaatje te staan. Tenslotte verbinden we de gardelektrode en de aardelektrode met een afsluitweerstand ( $50\ \Omega$ ). Met een coaxkabel worden de meetdraden naar de Digital Signal Analyser (DSA) geleid. Met dit apparaat kan het zeer korte meetsignaal opgenomen worden.

De resultaten van de SIP-metingen staan in onderstaande tabel vermeld:

Tabel 1: Resultaten SIP-meting.

$L_{SIP}$ [m]	$\Delta t$ [s]
$977 \cdot 10^{-3}$	$155 \cdot 10^{-9}$

De schokgolfsnelheid  $U_s$  kan uit deze gemeten waarde berekend worden. De deeltjessnelheid  $u_p$  in het PMMA kan berekend worden door deze de gemeten schokgolfsnelheid in de Hugoniot-vergelijking van PMMA in te vullen, die weer gegeven wordt door:

$$U_s^{PMMA} = C_0^{PMMA} + S^{PMMA} \cdot u_p^{PMMA} \quad (10)$$

$S^{PMMA}$ : 1,595 [-];

$C_0^{PMMA}$ : 2,500 [km·s<sup>-1</sup>];

$\rho_0^{PMMA}$ : 1,186 [g·cm<sup>-3</sup>].

Deze berekende deeltjessnelheid is gelijk aan de deeltjessnelheid op het *grensvlak* TNT-PMMA. Hieruit kan ook druk in het PMMA worden berekend.

$$P^{PMMA} = (S_{PMMA} \cdot \rho_{0,PMMA}) \cdot u_{p,PMMA}^2 + (C_{0,PMMA} \cdot \rho_{0,PMMA}) \cdot u_{p,PMMA} \quad (11)$$

De Hugoniot voor TNT wordt hiervoor zodanig gespiegeld, dat de drukken bij de deeltjessnelheid  $u_p^{PMMA}$  op het grensvlak gelijk zijn. Het punt waar de gespiegelde Hugoniot van TNT snijdt met de originele Hugoniot geeft dan de deeltjessnelheid  $u_p^{TNT}$  in het TNT. Hieruit wordt vervolgens de druk in het TNT,  $P^{TNT}$  berekend. De waarden voor de gebruikte Hugoniot van TNT zijn:

$S^{TNT}$ : 2,500 [-];

$C_0^{TNT}$ : 2,390 [km·s<sup>-1</sup>];

$\rho_0^{TNT}$ : 1,578 [g·cm<sup>-3</sup>].

De gevonden resultaten staan in de onderstaande tabel, de nauwkeurigheid van de resultaten wordt behandeld in hoofdstuk 5.

Tabel 2: Berekening van de druk in TNT uit de SIP-meting.

meting [-]	$U_s$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{TNT}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$P^{TNT}$ [GPa]
F-PSIP1	6,300	2,382	2,041	24,129

#### 4.1.2 De F-PVIS-meting (deeltjessnelheidsmeting)

De bedoeling is deeltjessnelheid gelijktijdig met de schokgolfsnelheid te meten zonder de originele SIP-opstelling ingrijpend te veranderen. Een probleem dat hierbij optreedt is dat een spiegelend meetobject nodig is dat een maat is voor de

deeltjessnelheid in het TNT. Ook moet een glasfiber met daarop een grinlens uitgelijnd kunnen worden ten opzichte van dit spiegelende meetobject.

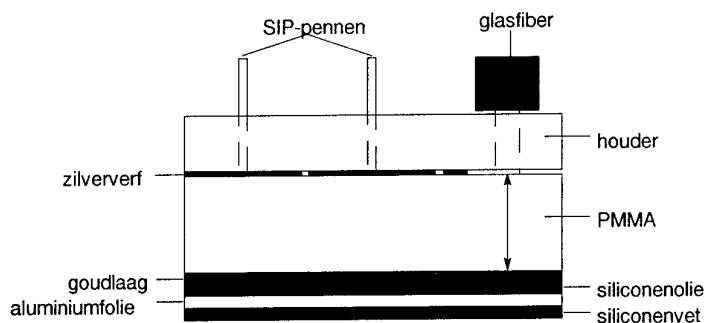
Als spiegelend meetobject dient het aluminiumfolie tussen het PMMA en het TNT. De Hugoniot-vergelijkingen van PMMA en TNT zijn bekend en hieruit kan met behulp van de schokgolftheorie de druk in het TNT worden berekend. Dat tussen de grinlens en het aluminiumfolie een laag PMMA zit is geen probleem omdat uit andere onderzoeken is gebleken dat bij een schokgolfdooorgang in PMMA alleen de brekingsindex verandert en geen verduistering optreedt zoals bij de meeste andere materialen.

Blijft het uitlijnprobleem: bij eerdere metingen met de F-PVIS is de grinlens in een driepootconstructie gezet. Hiermee wordt de meest ideale uitlijning ten opzichte van een spiegelend meetobject ingesteld. In deze opstelling is daar te weinig plaats voor. Een extra gat in de houder blijkt de driepootconstructie overbodig te maken. De grinlens wordt eenvoudig in het gat geschoven en met de hand gepositioneerd, een druppel lijm zet het geheel vast.

De film (zie bijlage A) laat een duidelijk strepenpatroon zien dat aangeeft dat er genoeg licht door het aluminiumfolie wordt gereflecteerd. Verder is te zien dat de strepen plotseling lichter worden, op dit moment heeft de schokgolf het aluminiumfolie bereikt. Er zou hier een verschoven strepenpatroon te zien moeten zijn, dit is echter niet het geval. Het lijkt erop dat het aluminiumfolie tijdens de schokgolfdooorgang zijn reflectiviteit heeft verloren. Er kunnen verschillende oorzaken zijn: de lucht tussen het TNT-patroon en het aluminiumfolie ioniseert waardoor het folie verbrandt of het aluminiumfolie verliest zijn reflectiviteit door de schokgolfdooorgang.

Verder is er ook een donkere streep dwars over de film te zien. Dit wordt veroorzaakt door de schokgolf die de lucht vlak voor de grinlens ioniseert. Uit deze film zijn geen deeltjessnelheden te bepalen.

## 4.2 Reflectie met een goudlaag (F-PSIP2)



Figuur 8: De opstelling van meting F-PSIP2.

Aan de opstelling voor de SIP-meting hoeft niets te worden veranderd, deze geeft al een goed signaal. De opstelling voor de F-PVIS-meting moet wel aangepast worden. Dit kan echter niet zonder de opstelling voor de SIP-meting beïnvloeden. De bedoeling is om aan de onderkant van het SIP-plaatje een goudlaag op de dampen, die als spiegelend meetobject dient. De dikte van deze goudlaag ligt in de orde grootte van enkele tientallen nanometers. De invloed hiervan op het resultaat van de SIP-meting zal vrijwel nihil zijn. Verder wordt er tussen het TNT en aluminiumfolie een laagje siliconenvet aangebracht. Er zit dan veel minder lucht onder het folie zodat er minder ionisatie van de lucht optreedt. Siliconenolie is beter maar trekt weg in de TNT-patroon. Tussen het aluminiumfolie en de goudlaag wordt wel siliconenolie gebruikt. Verder wordt een dikker SIP-plaatje gebruikt waardoor er langer met de F-PVIS gemeten kan worden. Door de donkere streep over de film van de vorige meting is het idee ontstaan dat behalve de deeltjessnelheid ook de schokgolfsnelheid met de F-PVIS te meten is. Een verschoven lijnenpatroon geeft immers aan dat de schokgolf het spiegelend meetobject heeft bereikt en de verschuiving houdt op als de schokgolf de grinlens op de glasvezel raakt. Als de grinlens direct op het SIP-plaatje wordt gezet kan de doorlooptijd uit de film worden berekend. De dikte van het SIP-plaatje is bekend en uit deze twee gegevens kan eenvoudig de schokgolfsnelheid berekend worden.

#### 4.2.1 De SIP-meting (schokgolfsnelheidsmeting)

De resultaten van de SIP-meting zijn:

Tabel 3: Resultaten SIP-meting.

$L_{SIP}$ [mm]	$\Delta t$ [s]
3,940	$692 \cdot 10^{-9}$

De resultaten van de SIP-meting worden op dezelfde manier verwerkt als bij de vorige SIP-meting. De gevonden resultaten zijn als volgt:

Tabel 4: Berekening van de druk in TNT uit de schokgolfsnelheid van de SIP-meting.

meting [-]	$U_s$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{TNT}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$p^{TNT}$ [GPa]
F-PSIP2	5,700	2,006	1,722	18,184

#### 4.2.2 De F-PVIS-meting (deeltjessnelheidsmeting)

Het strepenpatroon is zeer duidelijk; goud als reflecterend materiaal werkt dus goed. Op het punt dat het strepenpatroon lichter wordt is er kort een verschuivend patroon te zien. Hieruit kan een deeltjessnelheid worden afgeleid, met een microscoop worden de afstanden tussen de lijnen bepaald. Het verschoven strepenpatroon is onder de microscoop echter maar zeer kort zichtbaar. Door de film met een scanner in te lezen kan met behulp van beeldbewerkingssoftware de film iets duidelijker worden gemaakt, dit beeld staat in bijlage A.

Hierop is te zien dat het verschoven patroon keurig doorloopt tot het einde van de meting. Helaas is dit niet te zien onder de microscoop zodat het verloop van de deeltjessnelheid niet in goede resultaten is uit te drukken. Wel is te zien dat de deeltjessnelheid afloopt en waarschijnlijk nog snel ook. Waarom de reflectiviteit van het goud minder wordt is niet bekend, mogelijk is de schokgolf te krachtig of de drukverandering te groot. Waarom de deeltjessnelheid zo snel afloopt valt ook nog niet te verklaren. Er kan wel een doorlooptijd van de schokgolf door het SIP-plaatje uit de film worden gehaald, die een maat is voor de schokgolfsnelheid, zodat nu in één enkele meting met de F-PVIS twee grootheden bepaald kunnen worden. Deze meting is nog eens herhaald onder de naam F-PSIP3. Bij deze meting is gebruikgemaakt van een elektronische streakcamera. Metingen met behulp van deze camera zijn nog in de experimentele fase zodat resultaten hiervan nog niet beschikbaar zijn.

De lengte van de meting en afstanden tussen de lijnen van het niet-verschoven en het verschoven interferentiepatroon op de film zijn als volgt.

Tabel 5: Meetresultaten van de F-PVIS in meting F-PSIP2.

orde	$D_i$ [m]	$D_v$ [m]	$L_{\text{film}}$ [m]
1	$2,135 \cdot 10^{-3}$	$3,180 \cdot 10^{-3}$	
2	$3,345 \cdot 10^{-3}$	$4,105 \cdot 10^{-3}$	
3	$4,215 \cdot 10^{-3}$	$4,840 \cdot 10^{-3}$	
4	$4,935 \cdot 10^{-3}$	$5,480 \cdot 10^{-3}$	
5	$5,565 \cdot 10^{-3}$	$6,065 \cdot 10^{-3}$	
			$5,633 \cdot 10^{-3}$

Met de gemeten resultaten van de F-PVIS kan de deeltjessnelheid  $u_p$  met behulp van formule 7 worden berekend. In tabel 6 staat het gemiddelde van de over de verschillende ordes gemeten deeltjessnelheden. Met deze deeltjessnelheid kan de deeltjessnelheid in het TNT  $u_p^{\text{TNT}}$  direct worden berekend. Dit is een stap minder dan dezelfde berekening met de schokgolfsnelheid. Met de Hugoniot van TNT kan de druk in de springstof worden berekend.

Tabel 6: Berekening van de druk in TNT met de deeltjessnelheid uit de F-PVIS-meting.

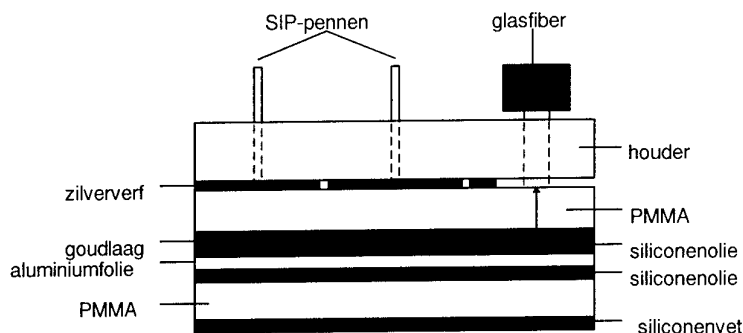
meting [-]	$u_p$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{\text{TNT}}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$p^{\text{TNT}}$ [GPa]
F-PSIP2	2,640	2,259	22,660

We weten dat de film met  $125 \text{ ns} \cdot \text{mm}^{-1}$  wordt beschreven. Bij een bekende lengte van het verschoven lijnenpatroon kan de doorlooptijd van de schokgolf in het SIP-plaatje worden berekend, en daarmee wordt de schokgolfsnelheid bepaald. De druk in de springstof uit de schokgolfsnelheid wordt op dezelfde manier berekend als bij de SIP-meting.

Tabel 7: Berekening van de druk in TNT met de schokgolfsnelheid uit de F-PVIS-meting.

meting [-]	$U_s^{\text{film}}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{\text{TNT}}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$p^{\text{TNT}}$ [km·s <sup>-1</sup> ]
F-PSIP2	5,596	1,941	1,666	17,235

### 4.3 Schokgolfdemping met PMMA (F-PVIS4)



Figuur 9: De opstelling van meting F-PVIS4.

De schokgolf in de vorige meting is waarschijnlijk te krachtig of de plotselinge drukverandering is te groot voor de goudlaag zodat deze minder reflecterend wordt. Om dit te voorkomen wordt een dun PMMA-schijfje (1 mm) tussen het aluminiumfolie en het TNT geplaatst. Tussen het PMMA-schijfje en het TNT-patroon wordt een laagje siliconenvet aangebracht. Tussen het schijfje en het aluminiumfolie zit siliconenolie. Volgens de schokgolftheorie moet de druk nu stapsgewijs naar zijn eindwaarde klimmen. Bij andere experimenten is gebleken dat de demping van PMMA ongeveer  $3\% \cdot \text{mm}^{-1}$  is, hiermee moet rekening worden gehouden in het resultaat. De rest van de opstelling blijft ongewijzigd.

#### 4.3.1 De SIP-meting (schokgolfsnelheidsmeting)

De resultaten van de SIP-meting zijn:

Tabel 8: Resultaten SIP-meting.

$L_{\text{SIP}}$ [m]	$\Delta t$ [s]
$0,978 \cdot 10^{-3}$	$162 \cdot 10^{-9}$

Tabel 9: Berekening van de druk in TNT uit de schokgolfsnelheid van de SIP-meting.

meting [-]	$U_s$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{\text{TNT}}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$p^{\text{TNT}}$ [GPa]
F-PSIP4	6,040	2,219	1,903	21,455

#### 4.3.2 De F-PVIS-meting (deeltjessnelheidsmeting)

De film is zeer duidelijk. Er is een goed verschoven lijnenpatroon te zien dat de gehele meting zichtbaar blijft zodat er weer een doorlooptijd te bepalen is. De verschoven lijnen zijn praktisch recht waaruit blijkt dat de schokgolf over 1 mm PMMA bij benadering ideaal en dus ongedempt verloopt. Ook de SIP-meting is goed verlopen.

Deze meting mag dus, als vergelijking tussen SIP en F-PVIS, als geslaagd worden beschouwd. Of het resultaat ondanks de relatief grote meetafstand een goede drukmeting is, blijft een vraag.

De verschoven lijnen zijn tot het einde van het experiment te zien. De afstanden tussen de lijnen zijn aan het begin en het einde van de verschuiving gemeten, hierin zit geen significant verschil. De afstanden zijn daarom op één punt bepaald.

Tabel 10: Meetresultaten van de F-PVIS in meting F-PSIP4.

orde	$D_i$ [m]	$D_v$ [m]	$L_{film}$ [m]
1	$2,240 \cdot 10^{-3}$	$3,100 \cdot 10^{-3}$	$1,290 \cdot 10^{-3}$
2	$3,405 \cdot 10^{-3}$	$4,040 \cdot 10^{-3}$	
3	$4,265 \cdot 10^{-3}$	$4,775 \cdot 10^{-3}$	
4	$4,980 \cdot 10^{-3}$	$5,420 \cdot 10^{-3}$	
5	$5,595 \cdot 10^{-3}$	$5,995 \cdot 10^{-3}$	

Tabel 11: Berekening van de druk in TNT uit de deeltjessnelheid van de F-PVIS-meting.

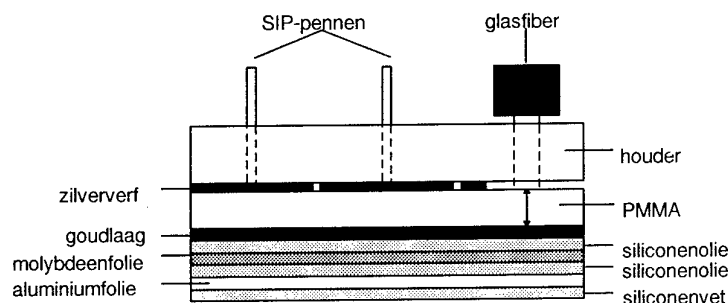
meting [-]	$u_p$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{TNT}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$p^{TNT}$ [GPa]
F-PSIP4	2,154	1,847	20,424



Tabel 12: Berekening van de druk in TNT uit de schokgolfsnelheid van de F-PVIS-meting.

meting [-]	$U_{s \text{ film}}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{\text{TNT}}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$p^{\text{TNT}}$ [km·s <sup>-1</sup> ]
F-PSIP4	6,065	2,235	1,916	21,705

#### 4.4 Mislukte meting dicht op de springstof (F-PSIP5)



Figuur 10: De opstelling van meting F-PSIP5.

Met de opstelling van meting F-PSIP4 is gebleken dat de resultaten zodanig zijn dat de SIP-meting en de F-PVIS-meting met elkaar vergelijkbaar zijn. De meetafstand tussen het meetobject en het explosief is echter wel groot, er zaten immers een laag aluminiumfolie, een schijfje PMMA, een laagje siliconenvet en twee laagjes siliconenolie tussen. Om nu te kijken of beide metingen met deze configuratie wel de goede schokgolf- en deeltjessnelheid meten, is geprobeerd dicht bij het explosief te meten.

Om dicht bij het explosief te meten is het PMMA bufferplaatje van meting F-PVIS4 door een laagje molybdeenfolie met een dikte van 10 µm vervangen. Molybdeen heeft een zeer hoge dichtheid zodat deze de schokgolf nauwelijks dempt. Ook het smeltpunt is hoog zodat eventueel geïoniseerde lucht bij de springstof de opgedampte goudlaag minder snel zal verbranden. De rest van de opstelling blijft ongewijzigd.

##### 4.4.1 De SIP-meting (schokgolfsnelheidsmeting)

Het resultaat van de SIP-meting wordt in de twee onderstaande tabellen weergegeven.

Tabel 13: Resultaten SIP-meting.

$L_{SIP}$ [m]	$\Delta t$ [s]
$0,978 \cdot 10^{-3}$	$158 \cdot 10^{-9}$

Tabel 14: Berekening van de druk in TNT uit de schokgolfsnelheid van de SIP-meting.

meting [-]	$U_s$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{TNT}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$p^{TNT}$ [GPa]
F-PSIP5	6,190	2,313	1,982	22,979

#### 4.4.2 De F-PVIS-meting (deeltjessnelheidsmeting)

De SIP-meting is gelukt, dit geldt niet voor de F-PVIS-meting. Het niet verschoven lijnenpatroon is slechts aan één zijde van de film goed te zien, aan de andere zijde van de film zijn de lijnen vaag zichtbaar. Van het verschoven lijnenpatroon zijn maar aan één zijde drie punten te zien (zie bijlage A). Na controle van de F-PVIS-opstelling bleek dat deze was ingesteld op de interne reflecties in het systeem. Dit was de oorzaak van de het slechte beeld op de film. Daarnaast lijkt het dat de goudlaag minder reflecterend is geworden tijdens de meting. Er is een deeltjessnelheid uit de film te halen maar deze is waarschijnlijk niet goed.

Bij deze meting is het begin van de verschuiving slechts aan één kant van de film te zien. Het niet verschoven patroon is aan beide kanten redelijk te zien en kan dus worden opgemeten. Met behulp van het niet verschoven lijnenpatroon kan het midden van de film bepaald worden. Door nu de afstand tussen het verschoven patroon en het midden van de film te verdubbelen kan toch nog een deeltjessnelheid worden bepaald. De meetfout wordt echter wel gelijk tweemaal zo groot. Ook het lichter en donkerder worden van de opname is niet te zien, de lengte van de film kan dus niet worden opgemeten.

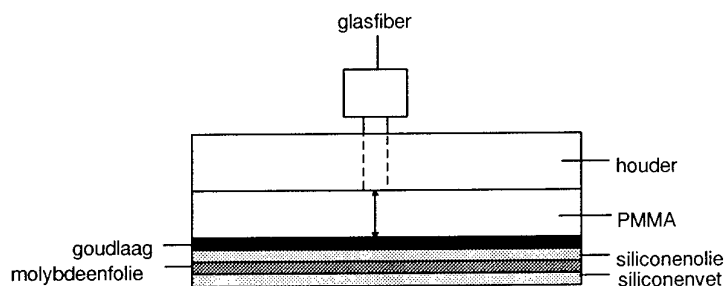
Tabel 15: Meetresultaten van de F-PVIS in meting F-PSIP5.

orde	$D_i$ [m]	$D_v$ [m]
1	$2,415 \cdot 10^{-3}$	$3,415 \cdot 10^{-3}$
2	$3,520 \cdot 10^{-3}$	$4,255 \cdot 10^{-3}$
3	$4,340 \cdot 10^{-3}$	$4,015 \cdot 10^{-3}$
4	$4,050 \cdot 10^{-3}$	$5,615 \cdot 10^{-3}$
5	$5,655 \cdot 10^{-3}$	$5,215 \cdot 10^{-3}$

Tabel 16: Berekening van de druk in TNT uit de deeltjessnelheid van de F-PVIS-meting.

meting [-]	$u_p$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{TNT}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$p^{TNT}$ [GPa]
F-PSIP5	2,862	2,448	32,867

#### 4.5 Gelukte meting dicht op de springstof (F-PSIP6)



Figuur 11: Opstelling bij meting F-PVIS6.

Er zijn genoeg resultaten van de SIP-meting. Om de opstelling minder gecompliceerd te maken wordt deze meting weggelaten. Er wordt geprobeerd met de F-PVIS zo dicht mogelijk op de springstof te meten. Voor de zekerheid wordt het 10 µm dikke molybdeenfolie uit de vorige meting vervangen door molybdeenfolie van 30 µm dik. Het aluminiumfolie deed alleen dienst als aardelektrode in de SIP-meting en wordt dus weggelaten. De siliconeolielaag tussen het goud en het molybdeenfolie blijft.

##### 4.5.1 De F-PVIS-meting (deeltjessnelheidsmeting)

Na het ontwikkelen van de film blijkt dat deze zeer scherp en goed belicht is. Ook het verschoven lijnenpatroon is goed te zien (bijlage A). Wat opvalt aan het verschoven lijnenpatroon is dat deze na de stapvormige verschuiving nog een stukje wat langzamer oploopt voordat deze zijn eindwaarde bereikt. In eerste instantie werd gedacht dat dit de Von Neumann-piek kon zijn. Na het opmeten van de lijnafstanden onder de microscoop blijken de verschoven lijnen alleen maar op te lopen en niet meer terug te lopen, het is dus geen piek. Wat waarschijnlijker is dat dit effect veroorzaakt wordt door reflecties in het dunne molybdeenfolie. Dat dit in voorgaande metingen niet is waargenomen wordt vermoedelijk veroorzaakt door-

dat de schokgolf eerst door een andere materiaal (molybdeen) gelopen heeft voordat deze het reflecterend meetobject bereikt. Hierdoor is de deeltjessnelheid al verhoogd. Als de schokgolf dan bij het grensvlak met PMMA aankomt, is er slechts een kleine sprong nodig om de waarde voor de deeltjessnelheid in het PMMA aan te nemen. Nu er zo dicht op het explosief wordt gemeten is het verschil in deeltjessnelheid veel groter zodat deze meer tijd nodig heeft om zijn eindwaarde te bereiken.

Op de film is te zien dat de lijnen van het verschoven interferentiepatroon eerst oplopen en daarna een constante waarde aannemen. In de volgende tabel zijn daarom de tijdsposities waarop de lijnafstanden zijn bepaald ook gemeten. De laatste positie is aan het einde van de verschuiving, deze wordt gebruikt voor de tijdberekening van de doorlooptijd van de schokgolf.

$L_{\text{PMMA}}$ :  $0,988 \cdot 10^{-3}$  m.

Tabel 17: Meetresultaten van de F-PVIS in meting F-PVIS6.

orde	$D_1$ [m]	$D_{v1}$ [m]	$D_{v2}$ [m]	$D_{v3}$ [m]	$D_{v4}$ [m]	$L_{v5}$ [m]
1	$2,070 \cdot 10^{-3}$	$2,870 \cdot 10^{-3}$	$2,940 \cdot 10^{-3}$	$2,965 \cdot 10^{-3}$	$2,970 \cdot 10^{-3}$	$2,975 \cdot 10^{-3}$
2	$3,300 \cdot 10^{-3}$	$3,820 \cdot 10^{-3}$	$3,890 \cdot 10^{-3}$	$3,910 \cdot 10^{-3}$	$3,925 \cdot 10^{-3}$	$3,915 \cdot 10^{-3}$
3	$4,175 \cdot 10^{-3}$	$4,610 \cdot 10^{-3}$	$4,660 \cdot 10^{-3}$	$4,685 \cdot 10^{-3}$	$4,690 \cdot 10^{-3}$	$4,695 \cdot 10^{-3}$
4	$4,900 \cdot 10^{-3}$	$5,270 \cdot 10^{-3}$	$5,315 \cdot 10^{-3}$	$5,345 \cdot 10^{-3}$	$5,355 \cdot 10^{-3}$	$5,360 \cdot 10^{-3}$
5	$5,525 \cdot 10^{-3}$	$5,870 \cdot 10^{-3}$	$5,910 \cdot 10^{-3}$	$5,925 \cdot 10^{-3}$	$5,925 \cdot 10^{-3}$	$5,930 \cdot 10^{-3}$
pos.	$L_1$ [m]	$L_2$ [m]	$L_3$ [m]	$L_4$ [m]	$L_5$ [m]	$L_6$ [m]
	$0,000 \cdot 10^{-3}$	$0,100 \cdot 10^{-3}$	$0,200 \cdot 10^{-3}$	$0,300 \cdot 10^{-3}$	$0,400 \cdot 10^{-3}$	$1,285 \cdot 10^{-3}$

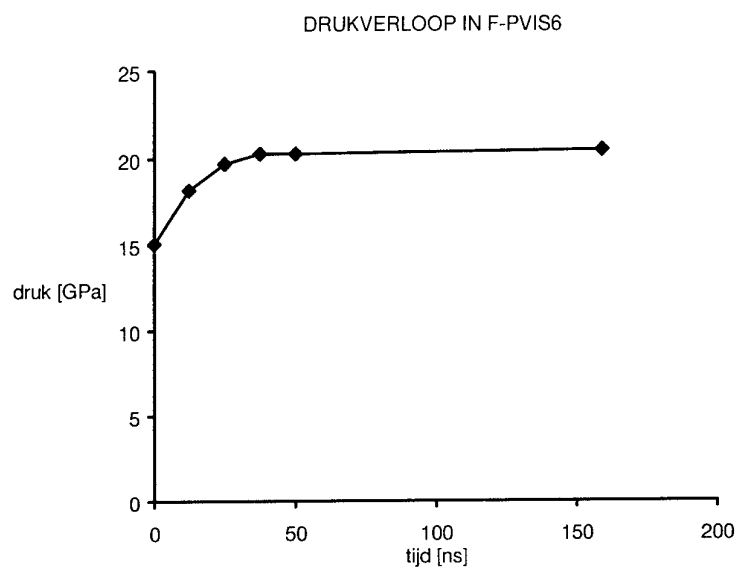
Tabel 18: Berekening van de druk in TNT uit de deeltjessnelheid van de F-PVIS-meting.

meting [-]	$u_p$ [km.s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{\text{TNT}}$ [km.s <sup>-1</sup> ]	$p^{\text{TNT}}$ [GPa]
F-PVIS6/1	1,786	1,534	15,075
F-PVIS6/2	2,007	1,722	18,195
F-PVIS6/3	2,107	1,807	19,698
F-PVIS6/4	2,143	1,838	20,253
F-PVIS6/5	2,158	1,850	20,486

Tabel 19: Berekening van de druk in TNT uit de schokgolfsnelheid van de F-PVIS-meting.

meting [-]	$U_s$ [km.s <sup>-1</sup> ]	$u_p$ [km.s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{\text{TNT}}$ [km.s <sup>-1</sup> ]	$p^{\text{TNT}}$ [GPa]
F-PSIP6	6,151	2,289	1,962	22,578

De posities uit tabel 17 worden naar de tijd omgerekend door deze te vermenigvuldigen met de schrijfsnelheid van de streakcamera, deze is  $125 \text{ ns} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Om het drukverloop te verduidelijken is deze in een grafiek tegen de tijd uitgezet.



*Figuur 12: Drukverloop in F-PVIS6.*

## 5 Foutberekening in de F-PVIS en SIP-resultaten

Omdat de foutberekening belangrijk is bij het meten en bij het vergelijken van verschillende meetmethoden wordt er bij de foutberekening uitgegaan van de resultaten van meting F-PSIP4. Om de drie meetmethoden te kunnen vergelijken is het niet noodzakelijk dat de absolute fout telkens helemaal wordt doorberekend tot de fout in het eindresultaat. Het is voor een vergelijking van de methoden voldoende om de relatieve fout van de druk in het PMMA te berekenen. Om van daaruit de druk in het explosief te berekenen moeten de drie methoden daarna dezelfde berekening ondergaan. De berekende fout in de druk in het PMMA die op deze manier wordt gevonden is dus evenredig met de fout van de druk in het explosief.

### 5.1 Fout in de druk uit de met de F-PVIS-gemeten deeltjessnelheid

De fout in de deeltjessnelheid, wordt berekend uit het veranderende interferentiepatroon berekend met formule 12.

$$\Delta u_p = \frac{1}{16 \cdot f_c^2} \cdot \left[ (D_v^2 - D_j^2) \cdot \left[ \frac{\Delta c \cdot f_c + 2c \cdot \Delta f}{f_c} \right] + [2 \cdot c] \cdot [D_v \cdot \Delta D_v + D_j \cdot \Delta D_j] \right] \quad (12)$$

waarin:

- $D_1 : 2,240 \cdot 10^{-3} \pm 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m};$
- $D_{v1} : 3,100 \cdot 10^{-3} \pm 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad u_{p1} : 2,153 \cdot 10^3 \pm 53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} (2,46\%);$
- $D_2 : 3,405 \cdot 10^{-3} \pm 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m};$
- $D_{v2} : 4,040 \cdot 10^{-3} \pm 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad u_{p2} : 2,216 \cdot 10^3 \pm 73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} (3,29\%);$
- $D_3 : 4,265 \cdot 10^{-3} \pm 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m};$
- $D_{v3} : 4,775 \cdot 10^{-3} \pm 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad u_{p3} : 2,161 \cdot 10^3 \pm 88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} (4,07\%);$
- $D_4 : 5,980 \cdot 10^{-3} \pm 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m};$
- $D_{v4} : 5,420 \cdot 10^{-3} \pm 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad u_{p4} : 2,145 \cdot 10^3 \pm 101 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} (4,71\%);$
- $D_5 : 5,595 \cdot 10^{-3} \pm 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m};$
- $D_{v5} : 5,995 \cdot 10^{-3} \pm 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad u_{p5} : 2,173 \cdot 10^3 \pm 112 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} (5,15\%).$

Door de kwadratische verhouding tussen  $D_j$  en  $D_v$  loopt de fout per orde op. Het zou dus, als de kwaliteit van de film het toelaat, het beste zijn om alleen de eerste orde van de film te gebruiken bij de bepaling van de snelheid. Om toch een zo nauwkeurig mogelijke indicatie te krijgen van de fout nemen we het gemiddelde van de berekende snelheid en fout over de eerste vijf ordes, dit komt overeen met het gewogen gemiddelde. De deeltjessnelheid is dan:

$$u_p : 2,154 \pm 0,086 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} (3,99\%).$$

De druk in het PMMA wordt berekend met formule 13.

$$P = (S \cdot \rho_0) \cdot u_p^2 + (C_0 \cdot \rho_0) \cdot u_p \quad (13)$$

De fout hierin is:

$$\begin{aligned} \Delta P = & (\rho_0^{PMMA} \cdot u_p^2) \cdot \Delta S^{PMMA} + (S^{PMMA} \cdot u_p^2 + C_0^{PMMA} \cdot u_p) \cdot \Delta \rho^{PMMA} + \\ & (\rho_0^{PMMA} \cdot u_p) \cdot \Delta C_0^{PMMA} + (2 \cdot S \cdot \rho_0^{PMMA} \cdot u_p + C_0^{PMMA} \cdot \rho_0^{PMMA}) \cdot \Delta u_p \end{aligned} \quad (14)$$

waarin:

SPMMA :  $1,595 \pm 0,015$ ;

$C_0^{PMMA}$  :  $2,500 \pm 0,082 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$\rho_0^{PMMA}$  :  $1,186 \pm 0,050 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;

pPMMA :  $15,163 \pm 1,887 \text{ GPa}$  (12,44%).

## 5.2 Fout in de druk uit de met de F-PVIS-gemeten schokgolfsnelheid

Bij het berekenen van de schokgolfsnelheid met de F-PVIS treedt de volgende fout op:

$$\Delta U_s = \left( \frac{\Delta L_{SIP}}{L_{SIP}} + \frac{\Delta L_{FILM}}{L_{FILM}} \right) \cdot U_s \quad (15)$$

waarin:

$L_{FILM}$  :  $1,290 \cdot 10^{-3} \pm 0,005 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ;

$L_{SIP}$  :  $978 \cdot 10^{-6} \pm 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ;

$U_s$  :  $6,065 \pm 0,054 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  (0,89%).

Bij deze schokgolfsnelheid is ervan uitgegaan dat deze constant is over de gehele dikte van het SIP-plaatje. In praktijk zal er een demping optreden. Hierdoor is de gemeten schokgolfsnelheid lager dan de schokgolfsnelheid op het grensvlak met het explosief. Wat de bijdrage is van deze demping op de grootte van de fout is (nog) niet in een getalswaarde uit te drukken.

Met formule 15 kan de fout in de deeltjessnelheid, berekend uit de schokgolfsnelheid met formule 14, bepaald worden:

$$U_s = C_0 + S \cdot u_p \quad (16)$$

waarin:

$C_0$ : plastische geluidssnelheid in het materiaal (afhankelijk van  $u_p$ ) [ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$S$ : materiaalconstante [-].

$$\Delta u_p = \left( \frac{\Delta U_s + \Delta C_0}{U_s - C_0} + \frac{\Delta S}{S} \right) \cdot u_p \quad (17)$$

waarin:

$$u_p : 2,235 \pm 0,106 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} (4,74\%).$$

De fout in de druk van het PMMA, berekend uit de schokgolfsnelheid gemeten met de F-PVIS, wordt berekend met formule 12,

waarin:

$$p_{\text{PMMA}} : 16,08 \pm 2,195 \text{ GPa} (13,65\%).$$

### 5.3 Fout in de SIP-resultaten

De fout in de berekening van de schokgolfsnelheid is:

$$\Delta U_s = \left( \frac{\Delta L_{\text{SIP}}}{L_{\text{SIP}}} + \frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} \right) \cdot U_s \quad (18)$$

waarin:

$$L_{\text{SIP}} : 978 \cdot 10^{-6} \pm 5 \cdot 10^{-6} \text{ m};$$

$$\Delta t : 162 \cdot 10^{-9} \pm 2 \cdot 10^{-9} \text{ s};$$

$$\Delta U_s : 6,040 \pm 0,105 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} (1,74\%).$$

De deeltjessnelheid in het PMMA wordt berekend met formule 14, de fout hierin wordt berekend met formule 15,

waarin:

$$u_p : 2,219 \pm 0,138 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} (6,22\%)$$

De deeltjessnelheid wordt omgerekend naar de druk in het PMMA met formule 11. De fout wordt berekend met formule 12,

waarin:

$$p_{\text{PMMA}} : 15,893 \pm 2,541 \text{ GPa} (15,84\%).$$



## 6 Drukberekeningen met de Kamlet-methode

De uitgevoerde berekeningen gaan er vanuit dat de Hugoniot van het explosief bekend is. Dit geldt echter niet voor alle explosieven. Om deze berekeningen toch uit te kunnen voeren wordt gebruikgemaakt van de Kamlet-methode, een empirisch bepaalde benadering voor de drukken in explosieve stoffen. Voor TNT is die weergegeven in formule 19.

$$P_{CJ} = \frac{\rho_0^2 \cdot D^2}{1,107 \cdot \rho_0^2 + 1,702 \cdot \rho_0 + 0,655} \quad (19)$$

Eerst moet deze Hugoniot gespiegeld worden om de deeltjessnelheid in het explosief  $u_p^{TNT}$ . Samen met formule (16), waarbij  $U_s$  wordt vervangen door de detonatiesnelheid, wordt deze omgeschreven naar:

$$P_{CJ} = (2 \cdot u_p^{TNT} - u_p)^2 \cdot (1,107 \cdot \rho_0^{TNT.2} + 1,702 \cdot \rho_0^{TNT} + 0,655) \quad (20)$$

Door deze gelijk te stellen aan de Hugoniot van PMMA kan met behulp van een spreadsheet de deeltjessnelheid  $u_p^{TNT}$  berekend worden. De druk in de springstof wordt hieruit berekend met formule 16, waarbij  $U_s$  wordt vervangen door de detonatiesnelheid. Hiervoor moet dus op een andere manier gemeten worden (bijvoorbeeld met ionisatiepinnen). Om deze benaderingsmethode te kunnen vergelijken met de resultaten uit het voorgaande hoofdstuk is tabel 20 opgenomen. De vet gedrukte waarde zijn de gemeten resultaten. Voor TNT is de detonatiesnelheid van  $6,950 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  aangenomen.

Tabel 20: Resultaten van benaderingsmethode + samenvatting resultaten.

meting -	methode -	$U_s$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$u_p^{TNT}$ [km·s <sup>-1</sup> ]	$P_{\text{berekening}}$ [GPa]	$P_{\text{kamlet}}$ [GPa]
F-PSIP1	SIP	<b>6,300</b>	2,382	2,041	24,129	22,434
F-PSIP2	F-PVIS		<b>2,640</b>	2,259	28,660	24,656
F-PSIP2	F-PVIS	<b>5,596</b>	1,941	1,666	17,235	18,615
F-PSIP2	SIP	<b>5,700</b>	2,006	1,722	18,184	19,180
F-PSIP4	F-PVIS		<b>2,154</b>	1,847	20,424	20,459
F-PSIP4	F-PVIS	<b>6,065</b>	2,235	1,916	21,705	21,161
F-PSIP4	SIP	<b>6,040</b>	2,219	1,903	21,455	21,025
F-PSIP5	F-PVIS		<b>2,862</b>	2,448	32,867	26,595
F-PSIP5	SIP	<b>6,190</b>	2,313	1,982	22,979	21,838
F-PSIP6	F-PVIS		<b>1,786</b>	1,534	15,075	17,268
F-PSIP6	F-PVIS		<b>2,007</b>	1,722	18,195	19,186
F-PSIP6	F-PVIS		<b>2,107</b>	1,807	19,698	20,052
F-PSIP6	F-PVIS		<b>2,143</b>	1,838	20,253	20,364
F-PSIP6	F-PVIS		<b>2,258</b>	2,158	20,486	21,359
F-PSIP6	F-PVIS	<b>6,199</b>	2,319	1,987	23,072	21,886

## 7 Conclusie en discussie

Uit meting F-PSIP4 blijkt dat de resultaten van de drukmetingen volgens de SIP-methode en de F-PVIS-methode goed met elkaar overeenkomen.

Toch is drukbepaling uit de deeltjessnelheid met de F-PVIS de beste methode. Bij een goede film kunnen de lijnafstanden met een fout van 0,01 mm opgemeten worden. De fout in de berekening van de uiteindelijke druk is dan ongeveer 12,5% en wordt voornamelijk veroorzaakt door de diverse omrekeningen. Bij een onscherpe film worden de lijnen dikker wat het eindresultaat sterk beïnvloed, een goede film is dus een voorwaarde.

Als de druk volgens de SIP-methode wordt bepaald is de fout hierin bijna 16%. Deze grote fout wordt vooral veroorzaakt door de fout die optreedt bij het aflezen van de tijd van de schokgolfdooorgang op de DSA. De relatief grote stijgtijd van het signaal bij het intreden van de schokgolf in het plaatje zorgt voor een meetfout van 5 ns. Verder moet de hieruit afgeleide schokgolfsnelheid eerst omgerekend worden naar de deeltjessnelheid, dit veroorzaakt een extra fout. Een voordeel is dat het signaal wat gemeten wordt ook echt het in- en uit treden van de schokgolf in het SIP-plaatje is, echt extreem grote afwijkingen kunnen dus niet optreden.

Dit geldt niet als de druk uit schokgolfsnelheid, gemeten met de F-PVIS, berekend wordt. Het is ook een goede methode maar er is een onzekere factor. Het is namelijk moeilijk te bepalen of de grinlens goed tegen het PMMA-plaatje aanzit. De dikte van het plaatje wordt met een fout van  $\pm 0,005$  mm opgemeten en als de grinlens niet goed tegen het PMMA-plaatje aanzit wordt deze fout snel groter. Dit heeft een grote invloed op de fout in de berekening van de schokgolfsnelheid en dus ook op de berekening van de uiteindelijke druk in het explosief. Bij een goede opstelling is de fout in de berekende druk uit de schokgolfsnelheid bepaald met de F-PVIS ongeveer 13,5%. Dit is beter dan de SIP-meting maar aan het resultaat moet dus in vergelijking met de SIP-meting minder waarde worden gehecht. Een groot voordeel van deze meetmethode is wel dat de gegevens voor berekenen van de schokgolfsnelheid altijd bij de gegevens van de deeltjessnelheidsmeting zitten. Met deze methode kunnen dus, mits de opstelling goed is, twee schokgolfgrootheden in één meting bepaald worden. Hiermee is één punt uit de Hugoniot-curve van het explosief bepaald, normaal zou hiervoor volgens twee methoden gemeten moeten worden.

De benaderingsmethode voor de Hugoniot van een springstof werkt goed. Het verschil tussen de berekende en benaderde waarde van de druk ligt binnen de fout van deze druk.

Het PMMA heeft een dempende werking op de schokgolf. Dit is te zien aan de afname van de deeltjessnelheid, en dus van de schokgolfsnelheid, in de film van

meting F-PSIP2. Door deze dempende werking kan er worden geconcludeerd dat voor een schokgolfsnelheidsmeting het PMMA-plaatje niet te dik mag zijn, er wordt immers een *gemiddelde* snelheid bepaald.

Het plaatje in meting F-PSIP2 van 3,94 mm is duidelijk te dik, beide schokgolfmetingen vallen met respectievelijk  $5,70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  en  $5,59 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  uit de toon met andere gemeten schokgolfsnelheden die allen boven de  $6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  liggen. De gemeten schokgolfsnelheden in meting F-SIP4, waar een 1 mm dik PMMA-buffer is gebruikt en meting F-PVIS6, waar alleen een stukje molybdeenfolie van  $30 \mu\text{m}$  dik op het TNT is geplaatst, verschillen niet veel. De 1 mm dikke PMMA-buffer heeft dus geen grote invloed op het resultaat. Een grote afwijking komt dus voor als er meer dan 2 mm PMMA gebruikt wordt. Desondanks wordt er toch naar gestreefd zo dicht mogelijk op het explosief te meten, dit is altijd beter.

De meest ideale opstelling om de druk in een explosief te meten is de opstelling van meting F-PVIS6 en maakt gebruik van  $30 \mu\text{m}$  dik molybdeenfolie. Pogingen om nog dichterbij het explosief te meten met  $10 \mu\text{m}$  dik aluminiumfolie (F-PVIS2) en  $10 \mu\text{m}$  dik molybdeenfolie mislukten door een slecht zichtbaar verschoven lijnenpatroon op de film. Ook een herhaling van meting F-PVIS5 met een nieuwe elektronische streakcamera (gegevens hiervan zijn helaas nog niet beschikbaar) liet een vaag, niet meetbaar, strepenpatroon zien. Mogelijk is op deze kleine afstand, de hitte veroorzaakt door het explosief zo intens dat de goudlaag wordt aangetast. Een andere mogelijkheid is dat de grote druk die in de Von Neumann-piek heerst toch iets buiten het explosief doorwerkt en de goudlaag aantast.

## 8 Verklaring van gebruikte symbolen en woorden

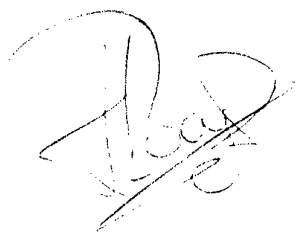
$\Delta\lambda$ :	Golflengte verschuiving door Doppler-effect	[m]
$\Delta t$ :	Doorlooptijd van de schokgolf door het SIP-plaatje	[s]
$\lambda$ :	Golflengte licht	[m]
$\varphi$ :	Faseverschil	[-]
$\rho_0^x, \rho_1^x$ :	Soortelijke massa voor en na de schokgolf in medium x	[kg·m <sup>-3</sup> ]*
$\theta$ :	Hoek tussen invallende lichtstraal en normaal	[rad]
$c$ :	Lichtsnelheid	[m·s <sup>-1</sup> ]
$C_0$ :	Plastische geluidssnelheid	[m·s <sup>-1</sup> ]*
$d$ :	Afstand tussen spiegels van Fabry-Perot etalon	[m]
$D$ :	Detonatiesnelheid	[m·s <sup>-1</sup> ]*
$D_j$ :	Diameter van ring j	[m]
$D_{j+1}$ :	Diameter van ring j+1	[m]
$D_v$ :	Diameter van verschoven ring j	[m]
$E_0^x, E_1^x$ :	Inwendige energie van medium x voor en na de schokgolf	[J·m <sup>-3</sup> ]
$F_c$ :	Fringe-constante	[m·s <sup>-1</sup> ]
$H^x$ :	Hugoniot van medium x	[-]
$I_t$ :	Lichtintensiteit van doorgelaten licht	[W]
$I_r$ :	Lichtintensiteit van gereflecteerde licht	[W]
$f_c$ :	Brandpuntsafstand van lens C	[m]
$L_{\text{film}}$ :	Lengte van de verschoven lijnen op de film	[m]
$L_{\text{SIP}}$ :	Dikte van het SIP-plaatje	[m]
$P$ :	Druk	[Pa]
$P_{\text{CJ}}$ :	Chapman-Jouguet-druk	[Pa]*
$P_0^x, P_1^x$ :	Druk voor en na de schokgolf x	[Pa]*
$R$ :	Reflectiecoëfficiënt	[-]
$S$ :	Constante	[-]
$t_{90\%}$ :	Fill-time	[s]
$u_p^x$ :	Deeltjessnelheid in medium x	[m·s <sup>-1</sup> ]
$u_p$ :	Deeltjessnelheid	[m·s <sup>-1</sup> ]*
$U_s$ :	Schokgolfsnelheid	[m·s <sup>-1</sup> ]*
$v$ :	Snelheid	[m·s <sup>-1</sup> ]
$V_0^x, V_1^x$ :	Inverse soortelijke massa	[m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]
$Z$ :	Schokgolfimpedantie	[kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]

\* In formules die met een 'curve-fit' zijn gemaakt, hebben de gemeten grootheden de eenheid [GPa], [km·s<sup>-1</sup>] of [kg·m<sup>-3</sup>].

## 9 Referenties

- [1] Hornemann, U.,  
Detonik, Fraunhofer Institut für kurzzeitdynamik (D-7858).
- [2] Hollenberg, Klaus,  
Druckmessungen an stoßwellen in Flußigkeiten und Festkörpern,  
Universität Düsseldorf, 1983.
- [3] Vries, H.L.M.P. de,  
Optische bepaling van schokgolf, eigenschappen m.b.v. de F-PVIS,  
(stage-eindverslag), 1994.
- [4] Kolk, I. van der,  
Snelheidsmetingen met de F-PVIS,  
(stage-eindverslag), 1995.
- [5] McMillan, C.F.,  
Velocimetry of fast moving surfaces using Fabry-Perot interferometry,  
Rev.Sci. Instrum., Vol 59, N°1, pp 1-20, januari 1988.
- [6] LASL shock Hugoniot data,  
University of California Press, Los Angeles, 1980.
- [7] Kolk, I. van der,  
Vergelijkende drukmetingen aan schokgolven,  
afstudeerverslag, december 1995.

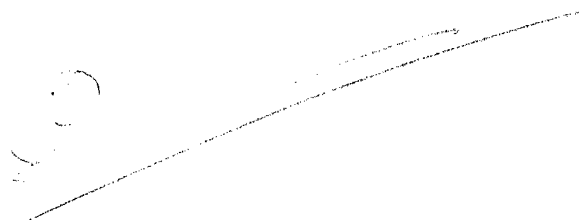
## 10 Ondertekening



Ing. M.P. van Rooijen  
(Projectleider/Auteur)



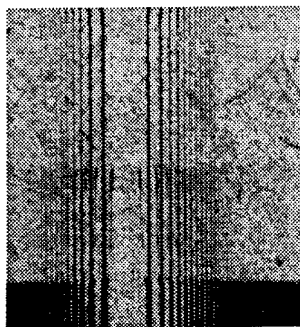
I. van der Kolk  
(Auteur)



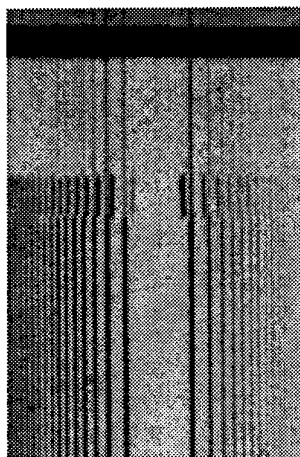
Dr. A.C. van der Steen  
(Groepshoofd)

---

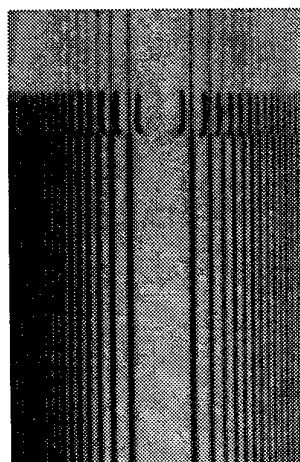
## Bijlage A      Streakopname F-PVIS



*Figuur A.1: Film van meting F-PSIP2, reflectie met een goudlaag.*



*Figuur A.2: Film van meting F-PSIP4, schokgolfdemping met PMMA.*



*Figuur A.3: Film van meting F-PSIP6, dicht op de springstof.*

# REPORT DOCUMENTATION PAGE

## (MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO. (MOD-NL) TD97-0018	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO.	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO. PML 1997-A18
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 221495018	5. CONTRACT NO. A94KL482	6. REPORT DATE June 1997
7. NUMBER OF PAGES 39 (incl. 1 annex, excl. RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES 7	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Een vergelijking van drukmetingen met SIP en de F-PVIS Comparison of SIP and F-PVIS pressure measurements		
11. AUTHOR(S) Ing. M.P. van Rooijen I. van der Kolk		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Prins Maurits Laboratory, P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands Lange Kleiweg 137, Rijswijk, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) KL, Wetenschappelijk Onderzoek, PO Box 90822, 2509 LV The Hague, The Netherlands		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified.		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) In this report two methods for measuring the detonation pressure are compared. These methods are: Shock Induced Polarisation (SIP) and a method that uses the Fabry Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS). To compare the accuracy of both methods, they are applied simultaneously. The detonation pressure that is calculated from the shock velocity in the SIP measurement will have a maximum error of approximately 16%. With the F-PVIS both shock velocity and particle velocity are measured. The detonation pressure can be calculated from both values resulting in a maximum error of approximately 13.5% and approximately 12.5%. The accuracy of this method will increase when the quality of the streak record is improved.		
16. DESCRIPTORS Detonation Shockwaves Pressure measurement Explosives Velocity measurement		IDENTIFIERS Interferometers Polarization Comparison
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited Distribution		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd



### Distributielijst\*

- 1\*/2\* DWOO
- 3 DWOO
- 4 HWO-KL
- 5\* HWO-KLu
- 6\* HWO-KM
- 7 DMKLu/DM/MWFAW1  
Maj. J. Paap
- 8 DMKM/WAPCOMSYS/GEMU/H  
KLtz. J.P. Naberhuis
- 9 DMKL/Munitie  
Ing. J.A. van Gool
- 10 Bureau TNO-DO
- 11/13 Bibliotheek KMA
- 14\* Lid Instituuts Advies Raad PML  
Prof. B. Scarlett, M.Sc.
- 15\* Lid Instituuts Advies Raad PML  
Prof. ir. K.F. Wakker
- 16\* Lid Instituuts Advies Raad PML  
BGen. Prof. J.M.J. Bosch
- 17 TNO-PML, Directeur; daarna reserve
- 18 TNO-PML, Directeur Programma; daarna reserve
- 19 TNO-PML, Hoofd Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid  
Dr. D.W. Hoffmans
- 20/24 TNO-PML, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid  
Dr. A.C. van der Steen, E.G. de Jong, Ing. M.P. van Rooijen, I. van der Kolk en  
Dr. ir. R.H.P. Bouma
- 25 TNO-PML, Documentatie
- 26 TNO-PML, Archief

---

\* De met een asterisk (\*) gemerkte instanties/personen ontvangen uitsluitend de titelpagina, het managementuittreksel, de documentatiepagina en de distributielijst van het rapport.